

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ РЕЗОНАНС ПОЗДОВЖНИХ ХВИЛЬ У ДВОПОТОКОВІЙ ЕЛЕКТРОННІЙ СИСТЕМІ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ НЕЛІНІЙНОГО ЗСУВУ ЧАСТОТИ

Куліш В.В. *професор*, Лисенко О.В. *доцент*, Ромбовський М.Ю.  
*асистент*, Булатов С.А. *студент*

Параметричний резонанс поздовжніх електронних хвиль в двопотоковій системі є одним із найважливіших елементів у роботі параметричних електроннохвильових ЛВЕ. Тому дослідження цього параметричного резонансу є задачею важливою та актуальною.

В роботі розглянуто резонанс трьох хвиль просторового заряду (ХПЗ) частота яких більша за критичну. Тому тут двопотокова нестійкість не реалізується. Одна з хвиль ХПЗ має найнижчу частоту та достатньо високу інтенсивність. Цю хвилю називаємо накачкою. Електронну хвилю з найбільшою частотою називаємо робочою. На вході в систему вона має амплітуду набагато меншу за амплітуду хвилі накачки. Параметри системи вибираємо такими, щоб мав місце параметричний трихвильовий резонанс між хвилями ХПЗ системи. Через це тут збуджується третя хвиля ХПЗ. Основною задачею цієї роботи є пошук умов максимального зростання робочої хвилі ХПЗ.

Особливість вище описаного параметричного резонансу полягає у тому, що він відбувається за наявності інтенсивної електронної хвилі накачки. Це приводить до того, що вже на початковій стадії розвитку процесів в двопотоковій системі суттєву роль грають нелінійні процеси. Одним з таких процесів є ефект нелінійного зсуву частоти. З математичної точки зору суть його полягає у тому, що нелінійний доданок, який пропорційний квадрату модуля амплітуди хвилі накачки стає більшим за лінійний доданок. Через це дисперсійне рівняння для електронної хвилі стає іншим. З фізичної точки зору ефект нелінійного зсуву частоти полягає у тому, що за наявності потужної електронної накачки фазова швидкість поширення хвиль у системі змінюється. Змінюється зв'язок між частотами та хвильовими числами електронних хвиль, з'являються нові умови параметричного резонансу.

В представлений роботі отримані в явному вигляді дисперсійні співвідношення з урахуванням ефекту нелінійного зсуву частоти. З'ясовані нові умови параметричного резонансу електронних хвиль, знайдені їх інкременти зростання. Отримані умови оптимального зростання робочої електронної хвилі в двопотоковій системі.

## НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ДВОПОТОКОВОЇ НЕСТІЙКОСТІ В СИСТЕМІ З ІНТЕНСИВНОЮ ЕЛЕКТРОННОЮ НАКАЧКОЮ

Лисенко О.В. *доцент*, Ромбовський М.Ю. *асистент*,  
Мироненко А.С. *студент*

Розглянута нелінійна динаміка електронних хвиль в двопотоковій системі, в якій збуджено експоненціально зростаючу та інтенсивну електронну хвилю. Зростаюча хвиля збільшується експоненціально завдяки ефекту двопотокової нестійкості. Інтенсивна електронна хвиля може бути як повільною так і швидкою. Параметри системи підібрано таким чином, що тут реалізується трихвильовий параметричний резонанс між електронними хвилями системи. Внаслідок цього параметричного резонансу в двопотоковій системі збуджується ще одна хвиля, яку називаємо робочою.

Побудована нелінійна теорія трихвильового параметричного резонансу електронних хвиль в двопотоковій системі у кубічному наближенні. На базі створеної теорії проведено комп'ютерне моделювання нелінійної динаміки амплітуд гармонік електронних хвиль. З'ясовані умови, коли наявність в системі інтенсивної електронної хвилі істотно стримує збільшення зростаючої хвилі просторового заряду. Також з'ясовано, що тут можливо реалізувати ситуацію, коли робоча електронна хвиля має частоту суттєво більшу за частоту зростаючої електронної хвилі і відбувається перекачування енергії від відносно низькочастотної зростаючої хвилі до високочастотної робочої хвилі.

Для побудови теорії використано ієрархічний асимптотичний метод теорії коливань та хвиль [1]. Комп'ютерне моделювання проводили за допомогою системи Matlab.

Розглянуті процеси можуть мати місце в супергетеродинних двопотокових лазерах на вільних електронах і повинні враховуватись при побудові теорії таких приладів. Також на базі розглянутих процесів можливо реалізувати нові режими роботи параметричних електроннохвильових лазерів на вільних електронах. Тому проведене дослідження є актуальним і має практичну цінність.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Kulish V.V. Hierarchical methods: Vol. I. Hierarchy and Hierarchic Asymptotic Methods in Electrodynamics, Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2002.

## НЕЛІНІЙНА КВАДРАТИЧНА ТЕОРІЯ ПЛАЗМА-ПУЧКОВОГО СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ЛВЕ З УРАХУВАННЯМ МУЛЬТИГАРМОНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОЗДОВЖНІХ ХВИЛЬ

Куліш В.В. *професор*, Лисенко О.В. *доцент*, Коваль В.В. *аспірант*,  
Герасімов С.С. *студент*

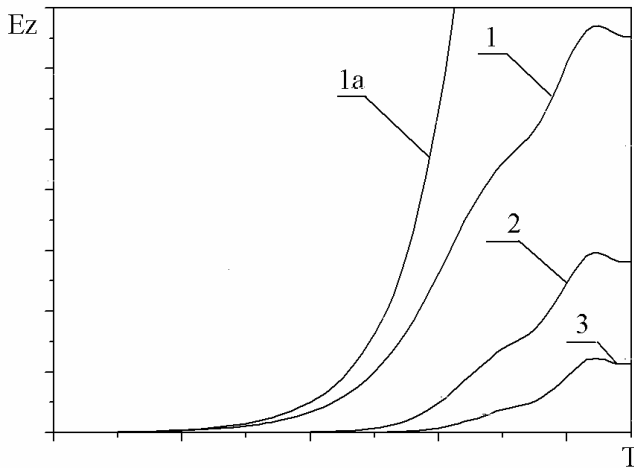
Розглядалась наступна модель плазма-пучкового супергетеродинного ЛВЕ. Через область, яка заповнена нерухомою плазмою, проходить електронний пучок. В цю систему подаються слабка електромагнітна хвиля сигналу у напрямку, який співпадає з швидкістю електронів пучка, та інтенсивна електромагнітна хвиля накачки у напрямку, який протилежний швидкості електронів пучка. Плазма та пучок знаходяться у поздовжньому фокусуєчому однорідному магнітному полі.

Завдяки ефекту плазма-пучкової нестійкості в цьому ЛВЕ виникає зростаюча хвиля просторового заряду (ХПЗ). Параметри хвиль системи вибираємо таким чином, щоб між електромагнітною хвилею сигналу, накачки та повздовжньою зростаючою хвилею просторового заряду мав місце трихвильовий параметричний резонанс. Завдяки плазма-пучковій та параметричній нестійкості реалізується можливість підсилення електромагнітного сигналу (ефект супергетеродинного підсилення). Інкремент зростання електромагнітного сигналу в такому ЛВЕ виявляється набагато більшими за інкременти зростання аналогічних систем.

Процеси в плазма-пучковому супергетеродинному ЛВЕ розглядались в роботах [1,2]. В цих роботах був проведений аналіз монохроматичного режиму роботи цього приладу. Тобто такого режиму, коли впливом вищих гармонік ХПЗ на процеси в досліджуваній системі можна було знехтувати. В представленій роботі розглянуто мультигармонічний режим, коли вплив вищих гармонік ХПЗ на процеси в системі стає суттєвим. Зазначимо, що істотний вплив вищих гармонік ХПЗ стає можливим завдяки тому, що фазова швидкість зростаючих хвиль ХПЗ має одне і теж значення. Завдяки цьому в плазма-пучковій системі стають можливими резонансні умови між гармоніками зростаючої хвилі ХПЗ.

В представленій роботі побудована мультигармонічна нелінійна квадратична теорія плазма-пучкового супергетеродинного ЛВЕ з урахуванням мультигармонічної взаємодії повздовжніх хвиль.

На базі цієї теорії проведено комп'ютерне моделювання динаміки хвиль у досліджуваному приладі. Показано, що реалізуються мультигармонічні режими роботи даного ЛВЕ, коли вплив вищих гармонік ХПЗ на процеси в системі стає суттєвим. Так на рисунку зображено залежність амплітуд гармонік зростаючої хвилі ХПЗ від нормованого часу. Крива 1а відповідає випадку, коли розрахунки ведуться з урахуванням однієї гармоніки ХПЗ. Криві 1, 2 та 3 описують динаміку 1-ї, 2-ї та 3-ї гармонік ХПЗ, відповідно, і обчислені з урахуванням резонансу вищих гармонік ХПЗ. Як бачимо динаміка амплітуди 1-ї гармоніки у випадку, коли до уваги прийнято лише одну гармоніку ХПЗ (крива 1а) та коли враховано мультигармонічну взаємодію гармонік ХПЗ (крива 1) суттєво відрізняються. Це означає, що для даних параметрів плазма-пучкового супергетеродинного ЛВЕ для опису нелінійної динаміки хвиль в системі принципово важливо враховувати резонанс вищих гармонік зростаючої хвилі ХПЗ.



#### ЛІТЕРАТУРА

1. Коцаренко Н.Я., Кулиш В.В. Об эффекте супергетеродинного усиления электромагнитных волн в системе плазма-пучок. //Радиотехника и электроника, 1980, т.25, №11, С. 2470-2471.
2. Куліш В.В., Лисенко О.В., Коваль В.В. До теорії плазма-пучкового супергетеродинного лазера на вільних електронах //Вісник Сумського держуніверситету: серія фізика, математика, механіка – вип. № 2 – 2007.

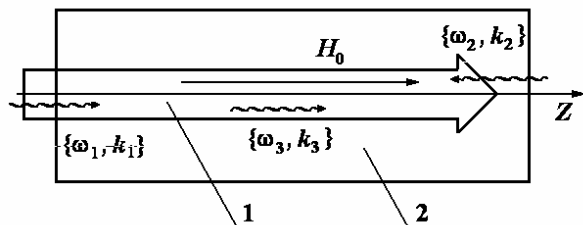
## КУБІЧНА НЕЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ПЛАЗМА-ПУЧКОВОГО СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ЛВЕ З ДОПЛЕРТРОННОЮ НАКАЧКОЮ

Куліш В.В. *професор*, Лисенко О.В. *доцент*, Коваль В.В. *аспірант*,  
Коник С.С. *студент*

Відомо, що супергетеродинні ЛВЕ, які в якості додаткового механізму підсилення використовують плазма-пучкову нестійкість мають високі інкременти зростання. Однак до сьогодні не вирішено питання про максимальні рівні хвиль, які можна досягти в таких системах. Саме розв'язанню цього питання і присвячена ця робота.

Розглядаємо наступну модель. Релятивістський електронний пучок 1 (див. рис.) проходить через плазму 2. Плазма-пучкова система

поміщена в поздовжнє фокусуюче магнітне поле з напруженістю  $H_0$ . Накачку вибираємо у вигляді незвичайної електромагнітної хвилі із частотою  $\omega_2$  й хвильовим числом



$k_2$ , що поширюється назустріч електронному пучку 1 (див. рис.). Також на вхід системи подаємо електромагнітний сигнал із частотою  $\omega_1$  й хвильовим числом  $k_1$  (див. рис.). У результаті параметричного резонансу між хвилею сигналу  $\{\omega_1, k_1\}$  й накачки  $\{\omega_2, k_2\}$  в плазма-пучковій системі збуджується хвиля просторового заряду (ХПЗ) із частотою  $\omega_3$  й хвильовим числом  $k_3$ . Параметри системи підбираємо таким чином, хвиля ХПЗ  $\{\omega_3, k_3\}$  мала максимальний інкремент зростання внаслідок плазма-пучкової нестійкості.

В роботі побудована кубічна нелінійна теорія плазма-пучкового супергетеродинного ЛВЕ з доплертронною накачкою. На базі цієї теорії проведено комп'ютерне моделювання. Знайдені рівні насичення сигналу в досліджуваній системі. З'ясовано, що ці рівні насичення є суттєво вищими за ті, що можливо отримати в еквівалентних двопотокових супергетеродинних лазерах на вільних електронах.

## АЛГОРИТМИ ТА ПАКЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ З СКЛАДНОЮ МУЛЬТИГАРМОНІЧНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ

Лисенко О.В. *доцент*, Савченко В.І. *приватний підприємець*,  
Чернобук С. В. *студент*

Досить часто в нелінійних коливально-хвильових задачах електродинаміки плазми, теорії лазерів на вільних електронах ми аналізуємо динаміку хвиль, які мають складний мультигармонічний спектр. Ці задачі розв'язуються за допомогою ієрархічного асимптотичного методу теорії коливачів та хвиль запропонованого проф. Кулішем В.В. Використовуючи відповідні алгоритми складна система, в якій має місце нелінійна взаємодія мультигармонічних хвиль, зводиться до більш простої, яка описується системою диференціальних рівнянь. Однак комп'ютерне моделювання цих задач є досить складним, коли потрібно врахувати хвилі, які мають десятки, а інколи і сотні гармонік. При цьому потрібно прийняти до уваги те, що ряд хвиль перебуває між собою у параметричному резонансі. Складність такого комп'ютерного моделювання полягає у тому, що потрібно аналітично знаходити сотні (тисячі) множників, які входять у склад диференціальних рівнянь. Виникає велика ймовірність помилки як на етапі аналітичних розрахунків, так і на етапі їх програмування.

Щоб розв'язати вище сформувану проблему розроблено алгоритм та пакет комп'ютерних програм для моделювання систем з складною мультигармонічною взаємодією. Тут мультигармонічний сигнал представляємо у відповідності до Фур'є розкладу у вигляді масиву, який складається з комплексних амплітуд відповідних гармонік. Взаємодію гармонік розглядаємо як перетворення відповідних масивів. Важливим елементом таких перетворень є множення двох та більше мультигармонічних сигналів однакової частоти, алгоритм якого виконано з використанням множення поліномів. Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді пакету комп'ютерних програм як клас *series* у системі *Matlab*. Проведена оптимізація цього класу за швидкістю обчислень.

Розроблені алгоритми та пакет комп'ютерних програм дозволяють ефективно моделювати системи з складними мультигармонічними взаємодіями.

# ФОРМУВАННЯ НАДКОРОТКИХ ХВИЛЬОВИХ ПАКЕТІВ У СИСТЕМІ НА БАЗІ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ЛАЗЕРУ НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ

Куліш В.В. *професор*, Лисенко О.В. *доцент*, Єськов І.Є. *студент*

У роботі [1] запропоновано принципово новий спосіб одержання фемтосекундних хвильових пакетів (ФХП) на базі двопотокових супергетеродинних лазерів на вільних електронах (ДСЛВЕ). Проведений аналіз показав, що цей спосіб дозволяє формувати вузьконаправлені ФХП високої середньої потужності (сотні кВт). Миттєва ж їхня потужність може досягати МВт і більше.

У даній роботі розглянуто можливість збільшення коефіцієнту

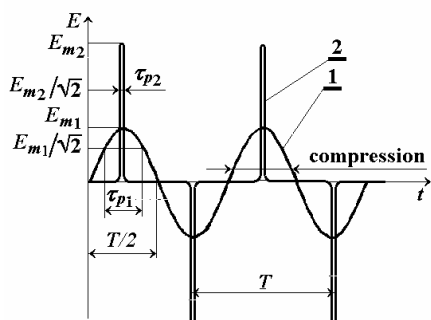


Рисунок 1

стискання ФХП за рахунок використання таких режимів роботи ДСЛВЕ, при яких частота першої гармоніки ХПЗ набагато менше оптимальної частоти двопотокової нестійкості. Сутність методу формування ФХП [2] представлена на рис. 1 (метод стискання хвильових пакетів). Вхідний синусоїдальний сигнал 1 формально може бути представ-

лений як послідовність напівсинусних імпульсів. Суть ідеї полягає в тому, що система повинна стиснути ці напівсинусні імпульси в послідовність дельта подібних (наприклад, фемтосекундних) імпульсів 2. Коефіцієнт  $f_{com}$  стискання, що характеризує цей процес, визначаємо як  $f_{com} = \tau_{p1} / \tau_{p2} \approx T / 4\tau_{p2}$ , де всі величини визначені на рис. 1. Зі зменшенням тривалості імпульсу  $\tau_{p2}$  або, іншими словами, зі збільшенням коефіцієнта стискання  $f_{com}$ , відбувається також збільшення амплітуди імпульсу.

Для технологічної реалізації цієї ідеї, у роботі [1] було запропоновано використати ДСЛВЕ (див. рис. 2). Тут двошвидкісний релятивістський електронний пучок 2, що складається із двох

парціальних взаємнопроникних компонентів, послідовно проходить через 1-у секцію накачки 3, пролітну секцію 4, другу секцію накачки 5. Слабкий електромагнітний сигнал 1 подається в 1-ю секцію накачки 3. Основним завданням цієї секції є модуляція електронного пучка 2 за рахунок параметричної резонансної взаємодії електромагнітної хвилі сигналу, поля 1-й секції накачки 3 і ХПЗ. Для цієї ж мети тут використовується ефект двопотокової нестійкості. У підсумку на вхід наступної секції - пролітної секції 4, входить промодульований двошвидкісний пучок 2. Хвиля сигналу 1 тут повністю поглинається системою поглиначів секції 4. У пролітній секції 4 завдяки механізму двопотокової нестійкості, а також множинному параметричному резонансу між гармоніками ХПЗ відбувається збудження й підсилення вищих гармонік ХПЗ.

Таким чином, на вхід другої системи накачки 5 надходить сильно модульований електронний пучок 2. Генерація потужного мультигармонічного електромагнітного сигналу 6 відбувається в 2-й системі накачки 5 завдяки реалізації параметрично-резонансної взаємодії підсилених мультигармонічних хвиль ХПЗ із мультигармонічним полем 2-й системи накачки 5. Тут же й відбувається формування електромагнітного ФХП 6.

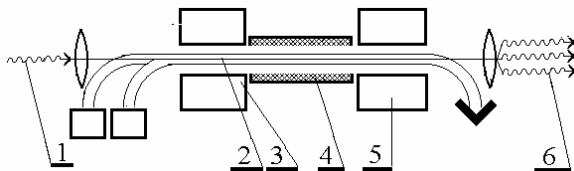


Рисунок 2

Особливість моделі розглянутої в [1] полягає в тому, що частота першої гармоніки ХПЗ  $\omega_{3,1}$ , що збуджується в першій секції

накачки 3, збігається з оптимальною частотою  $\omega_{opt}$  двопотокової нестійкості (при цьому інкремент зростання хвилі ХПЗ є максимальним). У такій системі механізм стискання характеризувався коефіцієнтом  $f_{com} \sim 4.5$  [1].

У даній роботі пропонується для підвищення коефіцієнта стискання  $f_{com}$  використати режими роботи, при яких частота першої гармоніки ХПЗ  $\omega_{3,1}$ , що збуджується хвилею сигналу, є набагато меншою оптимальної частоти двопотокової нестійкості ( $\omega_{opt} / \omega_{3,1} \gg 1$ ). У цьому випадку інкремент зростання ряду перших гармонік, для



яких  $\omega_{3,m} < \omega_{opt}$ , стає меншим інкременту зростання вищої гармоніки із частотою  $\omega_{opt}$ . Завдяки цьому в системі збуджується набагато більше число гармонік з приблизно однаковими амплітудами, чим у випадку  $\omega_{3,1} = \omega_{opt}$  й стає можливим створення систем з високим коефіцієнтом стискування.

Проведено проектний аналіз можливого експерименту. Відповідні розрахункові проектні параметри наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри	
Середня кінетична енергія двошвидкісного електронного пучка, [MeV]	1,2
Різниця енергій між парціальними одношвидкісними пучками, [MeV]	0,05
Плазмова частота пучка, [с <sup>-1</sup> ]	$6 \cdot 10^{10}$
Відношення частоти першої гармоніки ХПЗ до оптимальної частоти двопотокової нестійкості	15
Довжина хвилі вхідного синусоїдального електромагнітного сигналу, [мм]	4,9
Середня (по періоду) енергія вихідного ФХП, [Вт]	$7,2 \cdot 10^5$
Імпульсна потужність ФХП, [Вт]	$1,73 \cdot 10^7$
Тривалість вихідного ФХП, [фс]	340

Як бачимо, запропонована система дозволяє реалізувати формування ФХП із коефіцієнтом стискування  $f_{com} \sim 12$ .

Таким чином, у роботі проведено аналіз можливості створення потужного джерела ФХП електромагнітних хвиль на базі ДСЛВЕ. Запропоновано проект системи для формування таких хвильових пакетів. Показано, що для ефективного формування ФХП потрібно використати ДСЛВЕ клістронного типу, у якому частота першої гармоніки ХПЗ набагато менше оптимальної частоти двопотокової нестійкості. Показано можливість створення таких джерел на сучасному технологічному рівні.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. V.V. Kulish, A.V. Lysenko, V.I. Savchenko. Two-stream free electron lasers. International Journal on Infrared and Millimeter Waves, Volume 24, Number 4, 501-524, April 2003.

## ДО ТЕОРІЇ СТАЦІОНАРНИХ ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАНИХ ЕН-СИСТЕМ ЦИЛІНДРИЧНОГО ТИПУ

Куліш В.В. *професор*, Орлова О.О. *асистент*, Чернов С.В. *студент*

Побудовано теорію і проведено докладний фізичний аналіз стаціонарних циркулярно поляризованих ЕН-систем циліндричного типу з повздовжнім неоднорідним магнітним полем. Розроблено модель, яка дозволяє адекватно описувати динаміку базових робочих процесів. Показано, що найбільший інтерес для практики являють системи в яких реалізовано випадок зведеного циклотронно-параметричного квазірезонансу. Запропоновано реалізація даної моделі за рахунок повздовжньої неоднорідності: ведучого магнітного поля  $B_z$ , магнітного поля ЕН-убітрона або неоднорідного періоду ондуляції. Встановлені аналітичні залежності цих величин від повздовжньої координати системи.

Зроблено висновок, що в залежності від вибору керуючого параметра, за рахунок якого здійснюється утримання частинки в області квазірезонансу, та вибору області значень обраного параметра, система може виявитися або стійкою до вхідної помилки або нестійкою. Стійкими режимами є: додатне повздовжнє магнітне поле та ізохронізація за рахунок ондуляторного магнітного поля. Інші режими виявляються нестійкими.

Аналіз отриманих рівнянь показав, що якщо в якості керуючого параметра використовувати повздовжньо-неоднорідний розподіл поперечної компоненти магнітного поля ЕН-системи, то частинка просто осцилюватиме біля положення рівноваги.

Проведений аналіз циркулярно-поляризованої стаціонарної моделі показав можливість створення систем, в яких є можливим отримувати високоенергетичні пучки заряджених частинок при відносно невеликих електричних полях. Крім того, використання нестійких режимів роботи системи дозволить формувати пучки заряджених частинок з малим значенням емітансу.

## ОПТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ. РЕФРАКТОМЕТРІЯ

Захарова В.М. *старший викладач*, Дегтяр С.О. *студент*

До оптичного діапазону відносяться електромагнітні хвилі з довжиною від 100 до 10000 нм. Цей діапазон розділяють на три області: ультрафіолетову 100-380 нм; видиму 380-760 нм; інфрачервону 760-10000 нм.

В залежності від характеру взаємодії речовини з електромагнітним випромінюванням оптичні методи розділяють на :

- абсорбційні (засновані на вимірюванні поглинання речовиною світлового випромінювання). До них відносять калориметрію, фотокалориметрію, спектрокалориметрію, атомно-абсорбційні методи;
- емісійні (що базуються на вимірюванні інтенсивності світла випромінюваного речовиною). До них відносяться флюорометрія, емісійний спектральний аналіз та полум'яна фотометрія.

Методи, які пов'язані із взаємодією світлового випромінювання з суспензіями, поділяють на:

- турбідиметрію (засновані на вимірюванні інтенсивності світла, яке поглинається незабарвленою суспензією);
- нефелометрію (засновані на вимірюванні інтенсивності світла, яке відбувається або розсіюється забарвленою або незабарвленою суспензією).

Методи засновані на явищі поляризації молекул під дією світлового випромінювання ділять на:

- рефрактометрію (засновані на вимірюванні показника заломлення);
- поляриметрію (засновані на вимірюванні кута обертання площини поляризації поляризованого променя світла що пройшов через оптично активне середовище);
- інтерферометрію (засновані на вимірюванні зсуву інтерференції світлових променів при проходженні їх крізь кювети з розчином речовини, розчинником те крізь коліматор).

Оптичні методи аналізу нерозривно пов'язані з використанням сучасних приладів різної складності, через що збільшується вартість аналізу, але дає ряд переваг у порівнянні з класичними хімічними методами: швидкість, нерушійність зразків, простоту методики,

використання невеликої кількості речовини для аналізу, можливість аналізувати сполуки будь-якої природи, проведення експрес аналізу багатокомпонентних сумішей.

Рефрактометрія є одним з найбільш широко використовуваних аналітичних методів, що дозволяють визначити речовину, яка знаходиться в рідкому стані або концентрацію двохкомпонентних розчинів.

Рефрактометрія заснована на явищі заломлення світла при переході з одного середовища в інше, яке називають рефракцією.

У зв'язку з тим, що показник заломлення залежить від довжини хвилі, то показники заломлення для однакових речовин мають різні значення. Найбільш часто використовують показник заломлення для жовтої лінії натрію (589,3 нм). Показник заломлення залежить від внутрішнього стану речовини, від її температури, тиску, концентрації, природи розчинника. Тому для систематизації отриманих результатів, приймається показник заломлення, визначений при температурі  $20 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$  у спектрі натрію.

Принцип дії промислових рефрактометрів базується на використанні явища повного внутрішнього відбиття світла в оптичній призмі, що знаходиться в контакті з рідиною.

Рефрактометри можуть застосовуватися:

1. У медичних установах для визначення білка в сечі, сироватці крові, густина сечі, аналіз мозкової і суглобної рідини, густина субретинальної і інших рідин ока.

2. У фармацевтичній промисловості може застосовуватися для дослідження водяних розчинів різних лікарських препаратів: кальцію хлориду (10% і 20%), новокаїну (0,5%, 1%, 2%, 10%, 20%, 40%), ефедрину (5%), глюкозу (5%, 25%, 40%), магнію сульфату (25%), натрію хлориду (10%), кордіаміну і т.д.

3. У харчовій промисловості: на цукрових і хлібних заводах, кондитерських фабриках для аналізу продуктів і сировини, напівфабрикатів, кулінарних і борошняних виробів, визначає вологість меду (20%), для визначення частки сухих речовин у різних сулах, для визначення процентного вмісту жиру в твердих продуктах харчування.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

Захарова В.Н., *старший преподаватель,*  
Омар Шабан Хабиб, *слушатель ПО ФРИГ, бакалавр медицины*

Техногенные источники электромагнитных излучений, все больше используемые человеком, вносят свой отрицательный вклад в экологическое состояние нашей планеты.

К радиодиапазону относятся самые длинные электромагнитные волны (ЭМВ):  $\lambda$  от  $3 \cdot 10^3$  до 1м (частота  $10^5$  до  $3 \cdot 10^8$  Гц) – длинные, средние, короткие и УКВ-диапазоны, и  $\lambda$  от 1 до  $10^{-3}$ м (частота  $3 \cdot 10^8$  до  $3 \cdot 10^{11}$  Гц) – микроволновый диапазон. Радиоволны, взаимодействуя с биологическими структурами, могут терять часть энергии переменного электрического поля (ЭП), превращающейся в теплоту, за счет генерации токов проводимости в электролитах (крови, лимфе, цитоплазме клеток) и за счет поляризации диэлектриков тканей организма. Особенности распространения ЭМВ в живых тканях:

1. Характерной особенностью живых тканей является сильная зависимость из электрических свойств: диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты радиоволн.

2. С ростом частоты длина волны ЭМВ становится соизмеримой с размерами тела. Как известно, длина волны  $\lambda$  в веществе с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  определяется выражением:  $\lambda = c / (v \sqrt{\varepsilon})$ , где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света. Например, на частоте 460 МГц, применяемой в физиотерапии, длина волны в свободном пространстве ( $\varepsilon \approx 1$ ) составляет около 0,7м, а в мягких тканях тела человека только около 0,1м.

3. На высоких и сверхвысоких частотах вследствие высокой проводимости тканей энергия ЭМВ быстро превращается в тепло, и волны очень быстро затухают по мере прохождения по тканям тела: затухание по мощности в 2,7 раза происходит на пути в 1,5см. Максимальное поглощение энергии происходит в мышцах, крови. Костная и жировая ткани нагреваются меньше, т.к. содержат меньше воды.

4. Процесс взаимодействия ЭП с собственным ЭП биосистемы, прежде всего, ЭП, генерируемым сердечной мышцей. По форме это

поле вращающееся, т.к. вектор его напряженности совершает вращение с частотой  $1 - 2$  Гц. Поэтому по поверхности тела человека пробегают волны потенциала ЭП сердца.

Радиоволны от искусственных источников могут иметь большую интенсивность и оказывать отрицательное влияние на жизненно важные процессы.

Искусственными источниками радиоволн являются радиовещательные и телевизионные станции, радиолокаторы и спутниковые системы связи. Они могут давать до  $30 \cdot 10^9$  Вт в импульсе на частотах около  $10^{10}$  Гц. Для человека, находящегося в постоянном поле, интенсивность радиоволн  $0,1$  Вт/м<sup>2</sup> считается безопасной. На расстояниях более  $0,5$  км от радиовещательных станций радиоволны среднего, короткого и УКВ-диапазонов не вызывают в биообъектах значительных биофизических эффектов. В зонах, где интенсивность радиоволн достигает  $100$  Вт/м<sup>2</sup>, пребывание человека запрещено нормами Всемирной организации здравоохранения. Эффекты нагрева биотканей радиоволнами используется в медицине при проведении физиотерапевтических процедур с помощью аппаратов УВЧ, СВЧ-терапии, а также индуктотермии.

Хроническое действие на организм человека полей ВЧ и УВЧ приводит к нарушению функционального состояния центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы, биоэлектрической активности мозга и др.

При составлении эквивалентной электрической схемы взаимодействия человека с ЭП низкой частоты необходимо учесть, что на макроскопическом уровне имеется мощный шунт в виде пищеварительного тракта, электропроводность которого намного превосходит электропроводность кожи.

Рассмотрев эквивалентную электрическую схему взаимодействия человека с ЭП низкой частоты, можно выделить несколько вариантов механизмов этого взаимодействия:

1. Наведение на поверхности тела переменного потенциала (кулоновское взаимодействие).
2. Деформация диэлектрика (кожи) под воздействием ЭП (электрострикция).
3. Наведение в биообъекте токов (токи смещения).
4. Воздействие на биообъект токов проводимости.